

フォーカス距離の異なる二枚の画像間におけるぼけ量の差を利用した通行アフォーダンスの取得：輝度によるぼけ量測定と単眼カメラによる実現

著者	鉢嶺 大治
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-6
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022860

フォーカス距離の異なる二枚の画像間における ぼけ量の差を利用した通行アフォーダンスの取得 -輝度によるぼけ量測定と単眼カメラによる実現-

OBTAINING AFFORDANCE USING DIFFERENCE OF AMOUNT OF BLUR
BETWEEN TWO IMAGES WITH DIFFERENT FOCUS DISTANCE

-MEASURING AMOUNT OF BLUR FROM INTENSITY AND REALIZATION WITH MONOCULAR CAMERA-

鉢嶺大治

Daiji HACHIMINE

指導教員 伊藤一之

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

It is important tasks for robots to avoid obstacles and falling from high ground. In conventional work, jumping spider's method was hypothesized and experiments were conducted to verify the validation. In this study, we focus on the relationship between the intensity of pixels and amount of blur. We proposed the method using this relationship to realize the method with monocular camera. We also conducted experiments using a robot with a monocular camera and a small computer.

Key Words : Avoid obstacle, Affordance, Through aperture

1. はじめに

ロボットの制御において障害物との衝突や段差からの落下の回避は重要なタスクである。このようなタスクを実現するには距離センサの利用や環境の 3 次元モデル化が考えられる。しかし自然界では距離センサを持たず、処理能力の低いと考えられる小さい脳を持つ昆虫のような生物でもこれらのタスクを実現することができている[1][2]。

従来研究ではその中でもハエトリグモの網膜構造に着目し、ハエトリグモはピントの合う距離が異なる二つの網膜から得られるぼけ量の差のみをもとに転換点と呼ばれる情報を知覚して通行可能な方向のアフォーダンス[3]を得ているという仮説を立て、二台のカメラを搭載したロボットを用いた実験でその有効性が実証された[4]。本研究ではぼけ量と輝度勾配の関係を利用し、一台のカメラによって同様の手法を用いた障害物の回避を実現する。

2. 原理

物体がカメラや視覚器のフォーカス距離に存在する場合、鮮明な物体の像が観測される。反対に、物体がカメラや視覚器のフォーカス距離に存在しない場合はぼけた物体の像が観測される。これはフォーカス距離に存在する物体上の一点からの光は網膜などの撮像面の一点で収束するのに対し、フォーカス距離に存在しない物体上の一

点からの光は撮像面上の一点で収束せずに円状の一定の範囲に拡散するからである。この円は Circle of Confusion(CoC)と呼ばれ[5], この直径はぼけ量の指標として利用することができる。Fig.1 はレンズによって観測される物体の光の経路を表す。CoC の直径をぼけ量 b とした時、物体までの距離とぼけ量の関係はレンズの公式より式(1)のように表すことができる。ただし d はレンズの直径, f はレンズの焦点距離, l_o は物体からレンズまでの距離, l_i はレンズから撮像面(網膜)までの距離である。また、この関係をグラフに表すと Fig.2 となる。

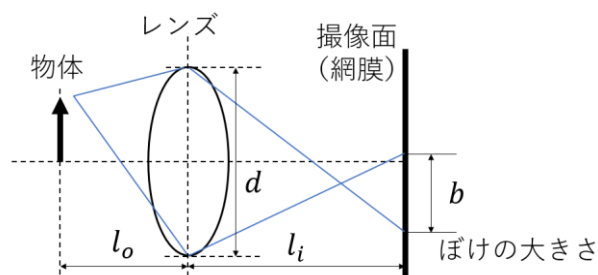


Fig.1 レンズを通して撮像面に写る物体からの光

$$b = \left| d \left(1 - \frac{l_o - f}{f l_o} \cdot l_i \right) \right| \quad (1)$$

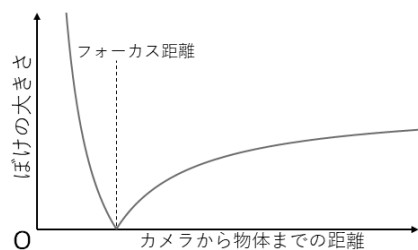


Fig.2 ぼけ量と物体までの距離の関係

グラフから読み取れるように物体までの距離が異なる場合でも同じ値のぼけ量をとる場合がある。よってぼけ量から物体までの距離を一意に決定することは不可能である。

3. 従来研究

(1) フォーカス距離の異なるぼけ量の差の利用

ハエトリグモの主眼はレンズから距離の異なる四つの網膜を持つ[6](Fig.3).

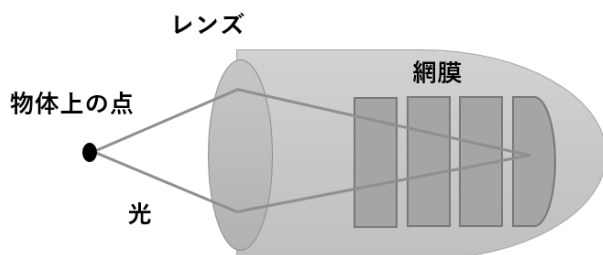


Fig.3 ハエトリグモの主眼の構造

これよりハエトリグモはフォーカス距離の異なる複数の像を同時に得て障害物などの回避に利用していると考えられることができる[7]. Fig.4 はフォーカス距離の異なる二種類の網膜によって観測されるぼけの大きさと距離の関係をグラフに表したものである。Fig.4 は任意の距離における網膜間のぼけ量の差もグラフとして表している。

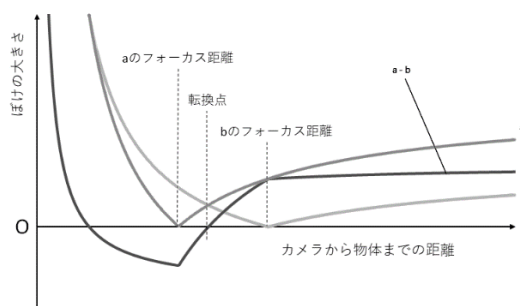


Fig.4 フォーカス距離の異なるカメラ間のぼけ量とそれらの差

グラフから読み取れるように二つの網膜間のぼけ量の差の正負は一定の距離で反転する。この符号が反転する距離を転換点と呼ぶ。これよりハエトリグモは環境中の

模様などのエッジなどのぼけを利用し、フォーカス距離の異なる二つのぼけ量の差の符号を確認することで、転換点を認識することが可能であることがわかる。

(2) 通行可能路の判定

二つの撮像面によって視覚情報を得ることで画像内の転換点の位置を観測することができる。平らで水平な地面を観測した場合、転換点は視野内の一定の高さに水平な線として現れる。この線が表れる位置は地面上の転換点の距離の位置と一致し、画像上のこの高さを地面レベルと呼ぶ。転換点よりも近い距離に障害物が存在し障害物の縁が地面レベルよりも高い位置に写っている場合は、その障害物の縁に転換点が現れる。これは視覚器から見て物体の縁が距離の転換点だからである。これにより障害物が存在する場合は地面レベルよりも高い位置に転換点が表れる。また転換点よりも近い距離に地面の縁が存在し地面の縁が地面レベルよりも低い位置に写っている場合は、その地面の縁に転換点が現れる。これは視覚器から見て地面の縁が距離の転換点だからである。これにより地面の縁が存在する場合は地面レベルよりも低い位置に転換点が表れる。これらの状態の視覚器(カメラ)と環境の図を Fig.5 に示す。

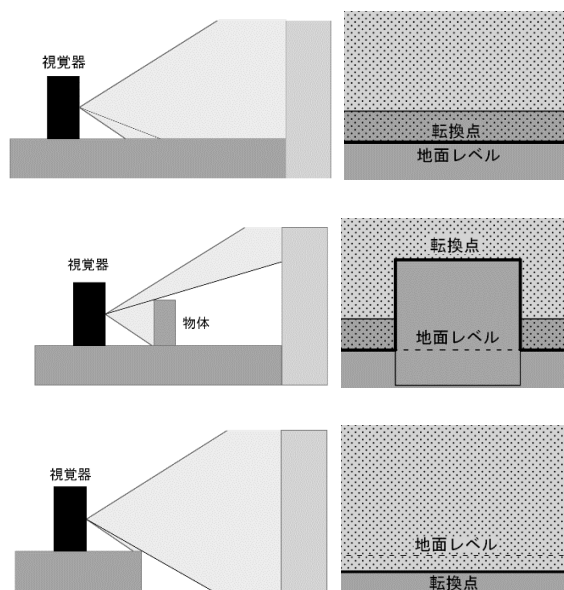


Fig.5 視覚器と環境の状態(左)とカメラに写る画像上から読み取れる情報(右)

これらの性質を利用すれば障害物や窪みの回避が可能である。つまり、転換点よりも近い距離と遠い距離の境界が地面レベルよりも高い場合は障害物が存在すると判定し、境界が地面レベルよりも低い場合は窪みが存在すると判定し、境界が地面レベルよりも同じ高さの場合は通行可能であると判定する。これによって地面が平らで通行可能路のみを選んで進むことが可能である。

(3) 実現手法

モーターによって走行可能な機体上にフォーカス距離

の異なる二台のカメラをマジックミラーによって同じ方向の画像が取得できるように固定した。二台のカメラは同時に画像を撮影し、フォーカス距離の異なる二枚の画像を得る。二枚の画像はそれぞれグリッドに分割し、グリッドの各セル内で一定の閾値を超える輝度差を持つ隣接画素のペアの個数をカウントすることでぼけ量を計測した。これによって二枚の画像間でセル毎のぼけ量の比較を行い、通行可能と判定された方向に走行を行うことを繰り返すことで障害物を避けながら走行を行うことができた。

4. 提案手法

(1) ぼけ量と輝度勾配の関係

本研究ではぼけ量と輝度勾配の大きさの関係を明らかにした上で、輝度勾配よりぼけ量の比較を行う方法を提案する。まず理想的なエッジを一次元の式(2)で表すようなステップ関数を含む関数 $f(x)$ で表すとする。

$$f(x) = Au(x) + B \quad (2)$$

画像のぼけは点広がり関数の畳み込みでモデル化することができ、これはガウス関数 $g(x, \sigma)$ で近似することができる[8]。ただし σ は CoC の大きさ (ぼけ量) に比例した量であり、ガウス関数の標準偏差である。ぼけ量 b はこの σ を使って

$$b = k\sigma \quad (3)$$

と定数倍で表されることが知られているため、 σ をぼけ量の指標として使用することができる。よって輝度勾配の大きさ $h(x)$ は以下の式(4)で表すことができる。

$$h(x) = \nabla(f(x) \otimes g(x, \sigma)) \quad (4)$$

フォーカス距離の異なる画像間の輝度勾配の差 $k(x)$ は以下の式(5)で表すことができる。また、これをグラフに表したものが Fig.6 となる。

$$\begin{aligned} k(x) &= \nabla(f(x) \otimes g(x, \sigma_1)) - \nabla(f(x) \otimes g(x, \sigma_2)) \\ &= \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) - \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_2^2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

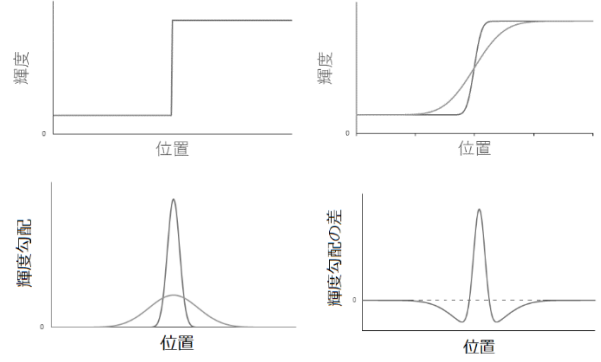


Fig.6 輝度のエッジ (左上) とそのエッジに二種類のぼけがかかった状態 (右上) とそれらの輝度勾配の大きさ (左下) と輝度勾配の差 (右下)

グラフからも読み取れる通り、位置によってぼけ量の大きいエッジのほうが高い輝度勾配の大きさを示す場合と、ぼけ量の小さいエッジのほうが高い輝度勾配を示す場合がある。これにより単純に画像内の各所で輝度勾配の大きさを比較するだけではぼけ量の比較が正しく行われなため、輝度勾配をそのままぼけ量の指標として利用することはできない。ぼけ量の比較を正しく行うためにはエッジの正確な位置において輝度勾配の比較を行えばよいが、そのためには輝度勾配の比較処理を行う前にエッジの正確な位置を検出する必要がある。

そこでエッジを含む一定の区間で二種類のぼけの輝度勾配の差を積分することでぼけ量を表すことを考える。まず、ぼけたエッジの輝度勾配の差の無限遠での積分値 I を求めると式(6)のようになり定数 A となる。よってぼけ量の算出はできない。

$$\begin{aligned} I &= \int_{-\infty}^{\infty} h(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \nabla(f(x) \otimes g(x, \sigma)) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \\ &= A \end{aligned} \quad (6)$$

そこで輝度勾配を二乗した後にその差の積分値 I を求めると式(7)のようになる。

$$\begin{aligned}
I &= \int_{-\infty}^{\infty} h^2(x) dx \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\nabla(f(x) \otimes g(x, \sigma)) \right)^2 dx \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^2 \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) dx \\
&= \frac{A^2}{2\sqrt{\pi}\sigma}
\end{aligned} \quad (7)$$

よってぼけ量 σ は以下の式(8)によって表すことができる.

$$\sigma = \frac{A^2}{2\sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h^2(x) dx} \quad (8)$$

また定数 C を

$$C = \frac{kA^2}{2\sqrt{\pi}} \quad (9)$$

と定義するとぼけ量 b は

$$b = \frac{C}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(x) dx} \quad (10)$$

と表すことができる. これより, ぼけ量 b を比較するには輝度勾配の二乗の積分値の逆数を比較すればよいということがわかる. 画像において輝度勾配は隣接画素の輝度差として近似することができるため, 以上の手法を二次元平面に適用することで画像処理として行うことが可能である.

(2) 実現法とアルゴリズム

従来手法ではマジックミラーを利用してフォーカス距離の異なる二台のカメラによって同じ方向の画像を取得していた. 本研究ではこれをカメラのフォーカス距離を順次変更して同じ位置と角度から二枚の画像を取得することで一台のカメラによって同様の処理を実現する. 搭載するカメラが減ることで開発コストが減少し, また従来研究ではカメラの設置誤差によって生じる二枚の画像のずれの補正が必要であったがこれが不必要となる. 取得した二枚の画像間でぼけ量の差を算出し, 転換点よりも近い領域と遠い領域を画像内で判定する. 具体的なぼけ量差の判定アルゴリズムは以下の通りである. 取得した画像はそれぞれ従来研究と同様にグリッドに分割する. グリッドの各セル内においては隣接画素間の輝度差の二乗を総和してそのセルのぼけ量とする. 二枚の画像

間で同じ位置に対応するセル同士でぼけ量の差を算出し, その値の正負によってそのセルの領域が転換点よりも遠いか近いかを判定する. 事前に機体を平坦な地面に置いたときのカメラに映る地面レベルの位置を記録し, その情報と判定した結果をもとに通行可能な方向の決定をし, その方向へ進むことを繰り返すことで障害物や地面の縁の回避を行いながらの走行が可能であると考えられる. Fig.8 に提案アルゴリズムのフローチャートを示す.

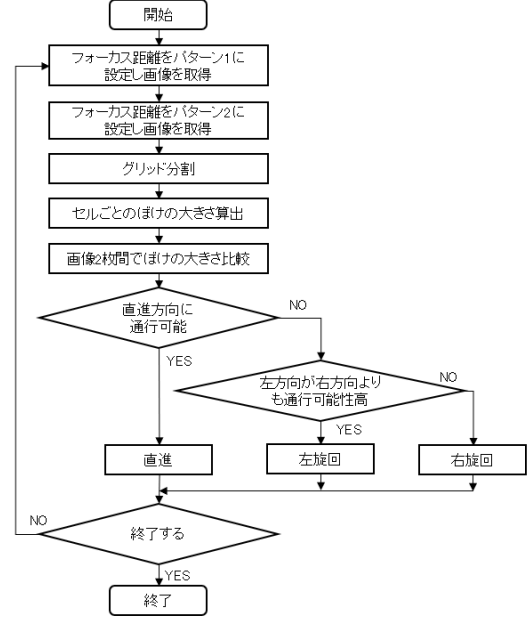


Fig.8 提案手法のフローチャート

5. 実験

モーターによって走行可能な機体の前方にカメラを搭載し, 小型のコンピュータによって提案手法の制御が行えるようにした. Fig.9 に作成した機体の概略図を示す. カメラで取得する画像の解像度は320×240とした. また, グリッドによる画像処理時のグリッド分解能は 10×10 とした.

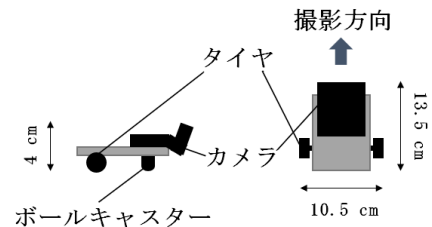


Fig.9 機体の概略図

そして障害物が設置された台の上に機体を置いて制御を開始させる試行を 10 回行った. またハエトリグモが行動する自然環境を再現して模様などのエッジを作るために, カメラから観測できる台と障害物の表面には新聞紙を貼り付けた. Fig.10 に上からの実験環境の配置図を示

す。

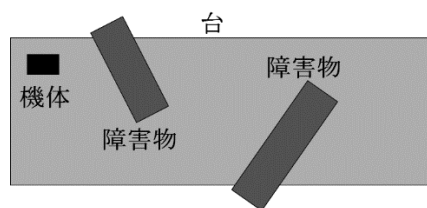
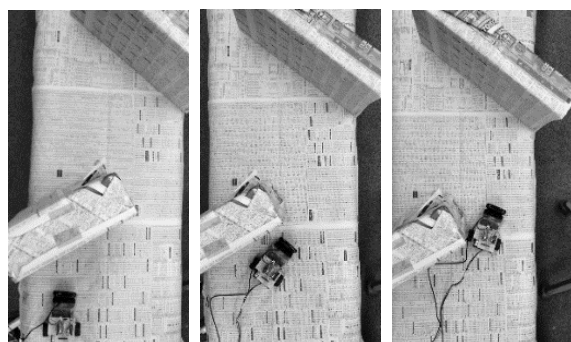


Fig.10 実験環境

6. 結果

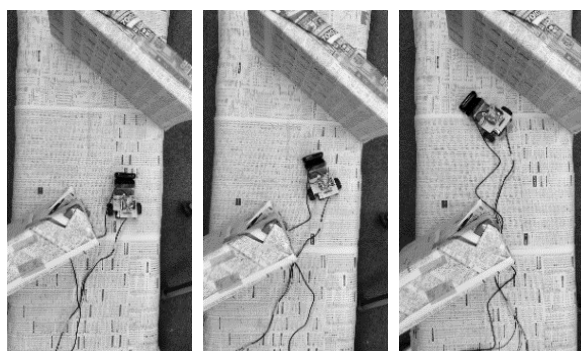
10 回中 7 回の試行で機体は障害物と地面の縁を避けながら走行し、障害物と接触することは全くなかった。また 10 回中 3 回の試行で機体が障害物を避ける際に機体の側面が障害物に接触することがあった。Fig.11 に実験の様子を示す。また Fig.12 に実験中に取得された画像の例と、その画像を処理し転換点よりも近いセルを白色、転換点よりも遠いセルを黒色で表した図を示す。



No. 1

No. 2

No. 3



No. 4

No. 5

No. 6

Fig.11 実験で観測された走行の例

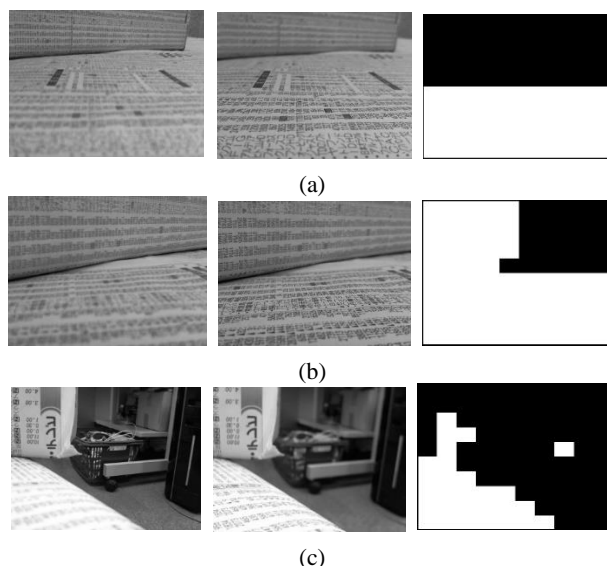


Fig.12 実験中に取得した画像と処理後の画像の例

7. 考察

本実験で分割したグリッドのセルの横幅は転換点の距離では約 15mm に相当するため、障害物の縁から最大で約 8mm の誤差が存在することが考えられる。そのため機体の側面が障害物に接触した原因は、グリッドによる分割が障害物を検出する際の実質的な解像度を下げたためであると考えられる。

実験中に取得された画像とその処理後の画像より、概ね正しく転換点が観測されていることがわかる。また、Fig.12 の(c)の処理後の画像では本来は転換点よりも遠いはずの領域の中に転換点よりも近い距離であると判定されている領域が存在する。これはその領域に含まれるエッジの輝度差が小さいことによって二枚の画像間のぼけ量の差が小さくなり、算出時に画像の明るさの僅かな違いなどの誤差の影響を受けたためであると考えられる。

障害物への接触はあったが、全ての試行において機体がカメラの画角内に存在する障害物や地面の縁を完全に無視することはなく、概ね障害物を避けながら落下をせずに走行することができたと言える。

8. 結論

本研究では輝度値よりぼけ量を測定し通行アフォーダンスを取得することで通行可能路を判定する手法を提案し、一台のカメラによって機体を走行させる実験を行った。機体は台からの落下や障害物との衝突の回避を行いながら走行することができた。これによって提案手法の有効性が証明された。

謝辞：最後に、本研究に際して多大なるご指導・ご協力をいただいた法政大学理工学部伊藤一之教授をはじめ、研究室の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Tarsitano, M., Route selection by a jumping spider (*Portia labiata*) during the locomotory phase of a detour. *Animal Behavior*, 72(6), 1437-1442, 2006.
- 2) Heinze, S., Neurobiology: Jumping Spiders Getting On Board. *Current Biology*, 24(21), 1042-1044, 2014.
- 3) Gibson, J. J., The ecological approach to visual perception. Boston, MA, US: Houghton, Mifflin and Company, 1979.
- 4) 高野祥吾, ハエトリグモの目の仕組みを利用した通行可能路の発見, 2018.
- 5) E. Hecht, Optics (4th Edition), Addison Wesley, 2001.
- 6) Land, M. F., Structure of the retinae of the principal eyes of jumping spiders (Salticidae: Dendryphantinae) in Relation to Visual Optics. *Journal of Experimental Biology*, 51(2), 443-470, 1969.
- 7) Nagata, T., Koyanagi, M., Tsukamoto, H., Sacki, S., Isono, K., Shichida, Y.,... Terakita, A., Depth perception from image defocus in a jumping spider. *Science*, 335, 469-471, 2012.
- 8) Zhou, S., Sim, T., Defocus map estimation from a single image. *Pattern Recognition*, 44(9), 1852-1858, 2011.